

UNCLASSIFIED

Defense Technical Information Center
Compilation Part Notice

ADP014158

TITLE: Exemples d'utilisation des techniques d'optimisation en calcul de structures de reacteurs

DISTRIBUTION: Approved for public release, distribution unlimited
Availability: Hard copy only.

This paper is part of the following report:

TITLE: Reduction of Military Vehicle Acquisition Time and Cost through Advanced Modelling and Virtual Simulation [La reduction des couts et des delais d'acquisition des vehicules militaires par la modelisation avantee et la simulation de produit virtuel]

To order the complete compilation report, use: ADA415759

The component part is provided here to allow users access to individually authored sections of proceedings, annals, symposia, etc. However, the component should be considered within the context of the overall compilation report and not as a stand-alone technical report.

The following component part numbers comprise the compilation report:
ADP014142 thru ADP014198

UNCLASSIFIED

Exemples d'utilisation des techniques d'optimisation en calcul de structures de réacteurs

Christian Paleczny et David Monteiro-Fernandes

Snecma Moteurs
Centre de Villaroche
77550 Moissy Cramayel
France

Introduction

Le contexte général de la compétition sur le marché militaire de l'aéronautique oblige les différents acteurs à réduire leurs coûts et à augmenter les performances de leurs produits. Cela implique un effort dans tous les domaines qui doit se traduire notamment par la réduction des cycles de développement, la diminution du nombre d'essais et la réduction du coût de fabrication.

Dans cette optique, les outils de simulation sont devenus indispensables pour prédire le comportement des pièces. Cela a permis de diminuer le nombre d'essais de manière significative, tout en concevant des pièces de plus en plus performantes et fiables.

L'évolution importante des capacités des ordinateurs permet désormais d'envisager des analyses de plus en plus complexes et de plus en plus nombreuses en phase de conception. Cela permet également de diminuer encore plus les risques technologiques.

Le dimensionnement mécanique des pièces et des structures pèse pour une lourde part dans ces coûts de développements. C'est le dimensionnement mécanique qui garantit l'intégrité physique du moteur.

A ce titre, les concepteurs sont tenus à une grande rigueur dans le travail effectué et au respect des procédures qualité. L'optimisation, c'est-à-dire l'atteinte d'un objectif donné (un niveau de contrainte, une fréquence) tout en respectant un certain nombre de critères (variation de forme, durée de vie, ...) est un domaine qui prend une importance croissante dans tous les bureaux d'études aéronautiques.

En optimisation de structures, nous distinguons différentes catégories :

- ☐ optimisation à base de connaissances (avant-projets)
- ☐ optimisation topologique (forme non définie par une CAO)
- ☐ optimisation de dimensionnement (épaisseurs de coques, caractéristiques matériau)
- ☐ optimisation géométrique (architecture figée)

A la différence du secteur automobile et des avionneurs, la plupart des composants des réacteurs nécessitent une optimisation géométrique dès le début de la phase de conception. L'optimisation géométrique est une catégorie assez complexe car sa mise en œuvre nécessite, dans un bureau d'études, le couplage automatique d'un logiciel de CAO paramétrée, d'un logiciel de maillages, d'un solveur élément finis et d'un logiciel d'optimisation. Certains logiciels intègrent toutes ces fonctionnalités de façon « transparente » et ont donc des performances très intéressantes. Néanmoins, ils ont des limites que les modélisations des composants des réacteurs atteignent de façon très fréquente.

C'est pourquoi, ces dernières années, se sont développés des logiciels d'optimisation ouverts permettant de gérer tout type de modélisation. Ces logiciels apportent des possibilités de couplage avec des logiciels de CAO, des solveurs éléments finis ou des logiciels développés en interne.

Après un bref chapitre détaillant les principales étapes permettant de bâtir un problème d'optimisation, cet article présentera quelques exemples d'utilisation de ces logiciels dans un contexte de bureau d'études mécaniques.

Processus d'optimisation

Le dimensionnement classique dans un bureau d'études repose encore souvent sur une approche essais-erreurs. C'est à dire, pour réaliser un composant, le concepteur doit:

- ❑ réaliser un modèle CAO initial à partir d'un cahier des charges, de son expérience et de l'environnement général où se situe sa pièce
- ❑ réaliser ensuite des modélisations (statique, dynamique, etc) permettant de vérifier les critères de dimensionnement
- ❑ itérer en modifiant sa conception de manière à respecter son cahier des charges

Le principe de base des logiciels d'optimisation est de pouvoir reproduire de façon automatique ce qu'un concepteur réalisait auparavant manuellement, en y ajoutant de nombreuses plus-values:

- ❑ possibilité de balayer un espace de conception plus large
- ❑ calculs automatiques
- ❑ possibilités de réaliser des plans d'expériences et de créer ainsi des fonctions d'approximation
- ❑ atteinte d'optimum grâce à des algorithmes de plus en plus performants

Pour le concepteur, les étapes-clefs en optimisation de forme sont donc:

- ❑ la réalisation du modèle de CAO paramétrée
- ❑ la détermination des analyses à effectuer (statique, dynamique, non linéaire, etc)
- ❑ la réalisation d'un modèle paramétré éléments finis et associé à la géométrie
- ❑ la définition des critères de dimensionnement associés à la pièces (contraintes maxi, plage de fréquence interdite, masse, déplacement maxi, etc)

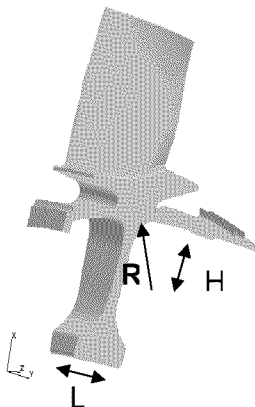


Figure 1 – Modèle CAO paramétré

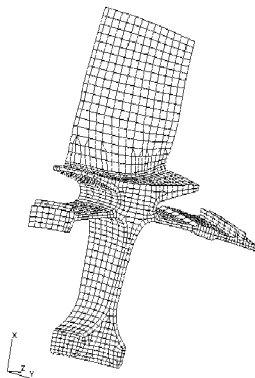


Figure 2 – Maillage paramétré

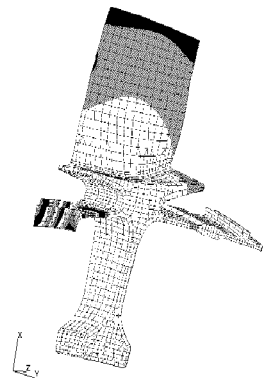
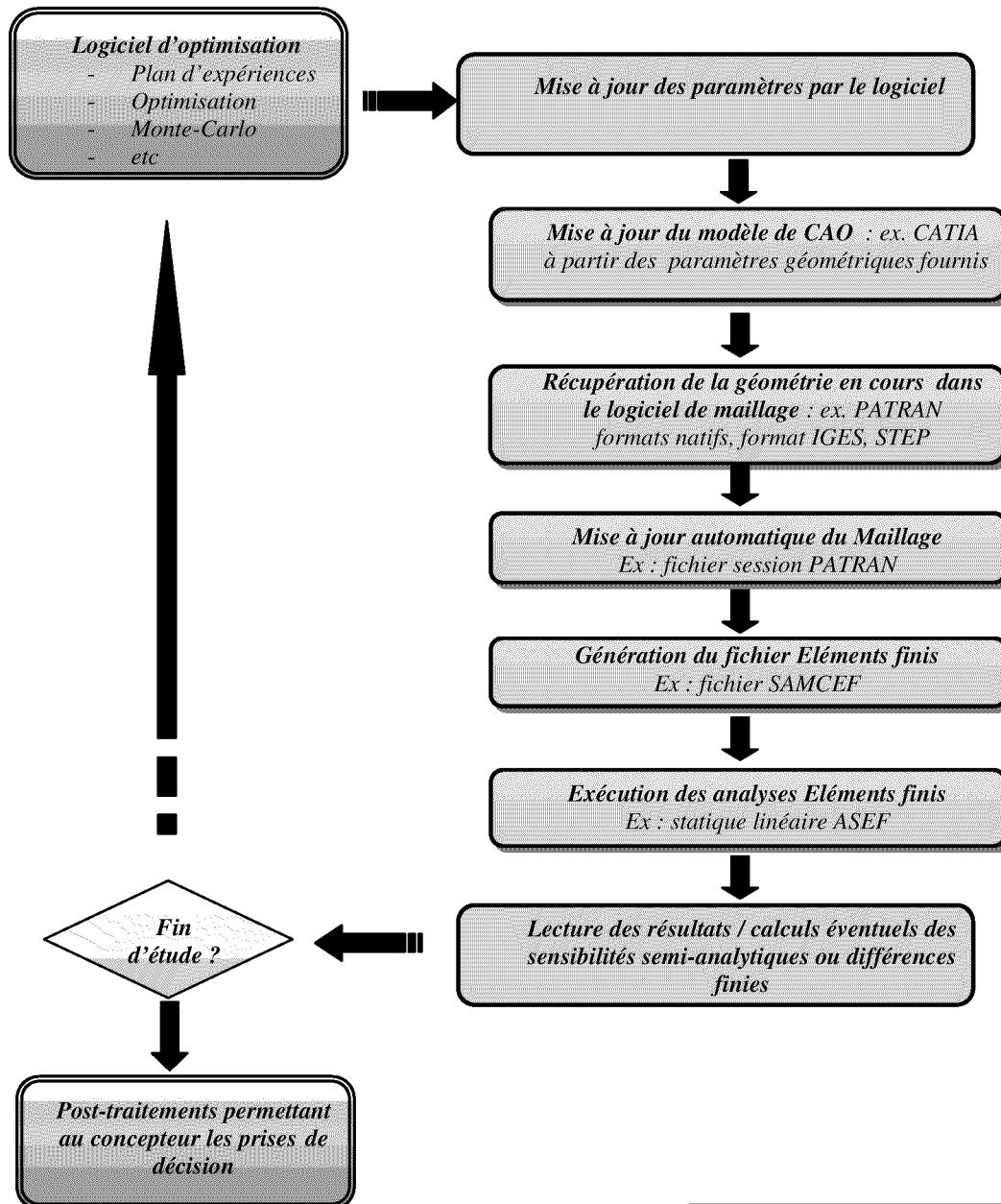


Figure 3 - Résultats

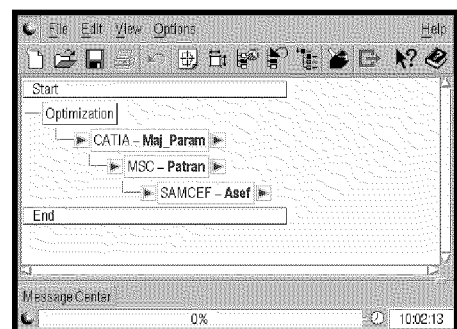
Le logiciel d'optimisation va être chargé de reconnaître et de gérer ces modèles (Eléments Finis, CAO, etc), de permettre à l'utilisateur d'identifier les paramètres sensibles, de piloter automatiquement le processus complet de calcul et de traiter les résultats en fonction des paramètres.

Le plan d'expériences se contentera de permettre la création de fonction d'approximation des fonctions (mais possibilités d'erreurs importante entre la fonction estimée et les points réels), tandis que l'optimisation directe utilisera les valeurs réelles des fonctions et en général les sensibilités (influence des paramètres sur les fonctions = dérivée des fonctions par rapport aux paramètres) pour atteindre des valeurs optimales. D'autres utilisations sont possibles : analyses probabilistes ou de Monte-Carlo, recalage de modèles (calculs-essais), etc.

Sans entrer dans les détails techniques (notion de perturbateur de maillage, gestion du calcul d'erreur, etc), dans le cadre de l'optimisation de structures, le logiciel d'optimisation va effectuer en batch le processus itératif suivant :



Ce processus se représente en général sous forme de schéma intégrant chacun des modules et des actions à exécuter.



Optimisation d'un disque à l'éclatement

Le premier exemple illustre un cas que les logiciels d'optimisation de base ne savent pas traiter, car il nécessite d'utiliser un code de mécanique non linéaire et porte sur un critère (rupture de pièce) rarement implémenté. L'exemple a servi dans le passé à valider l'utilisation de plan d'expériences et d'études d'optimisation au sein du bureau d'études.

La pièce concernée est un disque de réacteur. Le rôle essentiel des disques est la rétention des aubes de compresseur ou de turbine et le maintien des jeux en bout d'aube. Ce sont des pièces tournantes « à défaillance catastrophique » pour l'avion. Le dimensionnement de ces disques requiert donc le respect des règles imposées par les autorités certifiantes et le respect d'un ensemble de critères issu du savoir-faire de Snecma Moteurs.

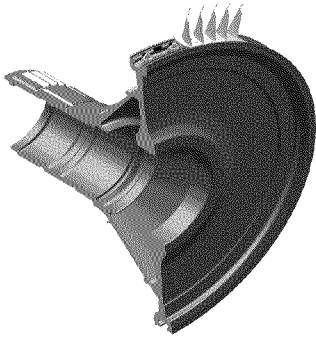


Figure 4 – modèle de disque

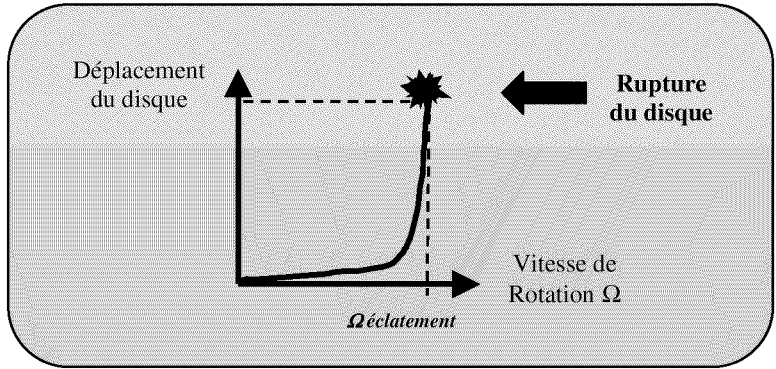


Figure 5 – détermination de la vitesse d'éclatement

L'expérience a montré que les disques éclatent dès que l'on dépasse une vitesse de rotation critique, à cause de l'augmentation rapide des charges centrifuges. Cette vitesse d'éclatement peut être obtenue par essai, par formules analytiques ou estimée par des modèles éléments finis. A titre d'information, le modèle numérique que l'on réalise utilise des lois de comportement matériaux non linéaires ainsi que des hypothèses de grands déplacements.

L'étude d'optimisation consiste à minimiser la masse du disque tout en respectant une vitesse de rupture supérieure à une limite imposée (ex : 1600 rad/s). Pour cette étude, nous avons modélisé un disque simple et décidé de sélectionner trois paramètres qui influent sur la rupture : l'épaisseur de la toile du disque E1, la hauteur L3 et la largeur L2 d'alésage. Le modèle réalisé est un modèle 2D. L'aube est modélisée par un ensemble de masses ponctuelles situées au niveau de la jante.

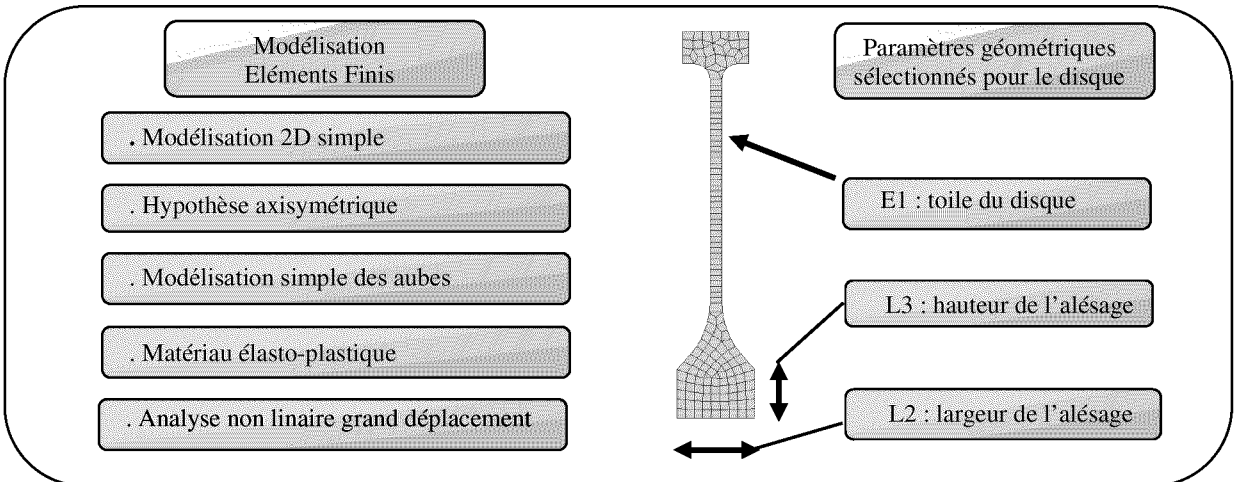


Figure 6 – paramétrage et maillage du disque

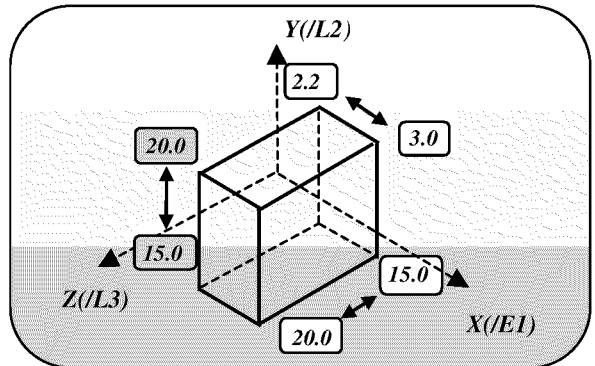
Le problème d'optimisation que l'on se propose d'étudier est donc :

- ❑ minimiser la masse du disque,
- ❑ vérifier que la vitesse d'éclatement de la pièce est supérieure à la vitesse limite.

Afin d'explorer l'espace de conception et d'étudier le comportement des fonctions, une étude paramétrique a été menée. Cette étude permet de déterminer l'évolution de la vitesse d'éclatement et de la masse en fonction des paramètres. Cette étude permet aussi de trouver une position approchée de l'optimum et de valider l'optimum trouvé par la méthode directe.

Un exemple d'application numérique est donné ci-après. L'espace de conception est défini par les plages de variation des paramètres suivantes:

$2*E1$: 4.4 à 6 mm par pas de 0.4 mm (5 valeurs),
 $2*L2$: 30 à 40 mm par pas de 2.5 mm (5 valeurs),
 $L3$: 15 à 20 mm par pas de 1.25 mm (5 valeurs).



Toutes les combinaisons des paramètres ont été étudiées, soit 125 calculs non linéaires dans un domaine de conception cohérent avec l'objectif. Une fois ces calculs obtenus, nous avons créé une surface de réponse, nous pouvons donc avoir une représentation de l'évolution des critères dimensionnants en fonction des paramètres géométriques.

La même étude a été ensuite lancée en vue d'une optimisation directe en utilisant un algorithme classique (linéarisation convexe). Le logiciel a convergé en une dizaine d'itération vers un point optimum très proche de ce que l'on trouve en analysant les résultats du plan d'expériences.

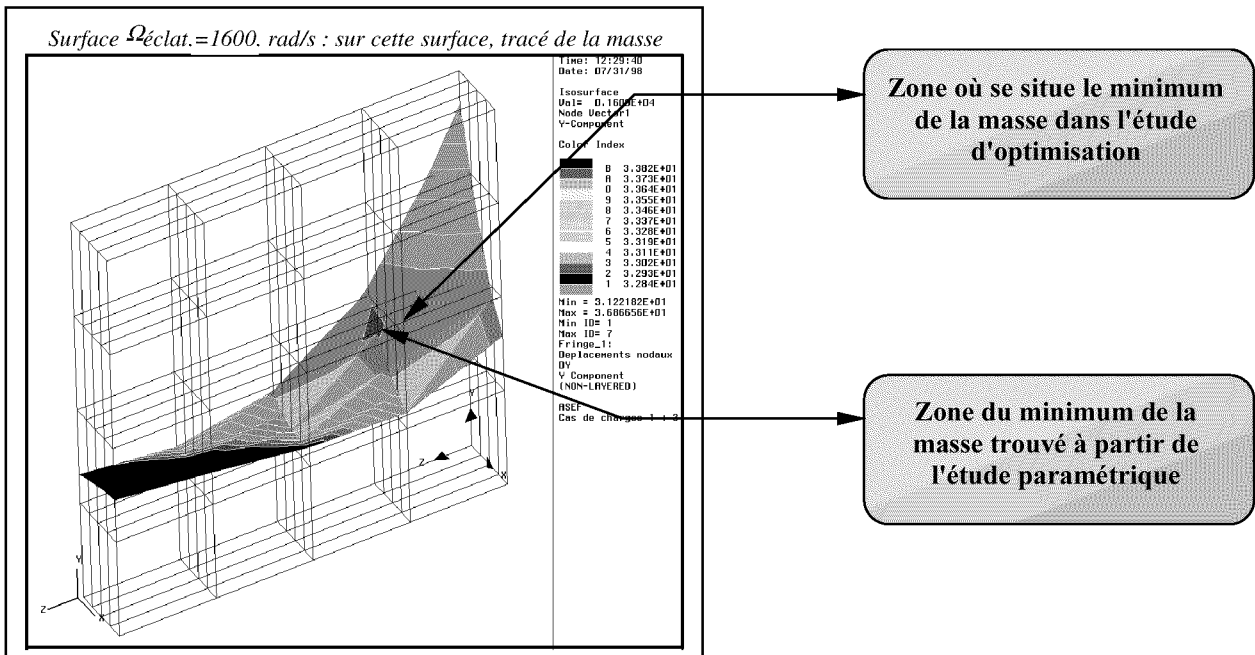


Figure 8 – Surface de réponse et optimum direct

Optimisation de brides festonnées

Un réacteur est constitué de nombreuses brides de liaison. Elles sont présentes aussi bien sur des pièces en rotation que sur des carters structuraux.

L'opération de festonnage des brides permet de gagner de la masse, ainsi que de diminuer les niveaux de contrainte au fond des trous de vis (contrainte générée par le flux des contraintes tangentielles). Le bon dimensionnement de la géométrie des festons permet d'absorber une partie de ces contraintes.

L'étude que nous présentons a permis :

- ❑ de valider la chaîne complète d'optimisation intégrant le logiciel de CAO (CATIA), le logiciel de maillage (PATRAN) et le solveur éléments finis (SAMCEF)
- ❑ de mieux appréhender la problématique « qualité de maillage » et « optimisation », lorsque l'on ne dispose pas de techniques de « perturbateur de maillage » (re-localisation automatique des nœuds du maillage en fonction des variations de géométrie), ni de calculs de sensibilités semi-analytiques.

Le modèle de bride paramétrée est décrit dans les figures suivantes. En utilisant les symétries, on ne se préoccupe que d'une demi-période circulaire de cette bride.

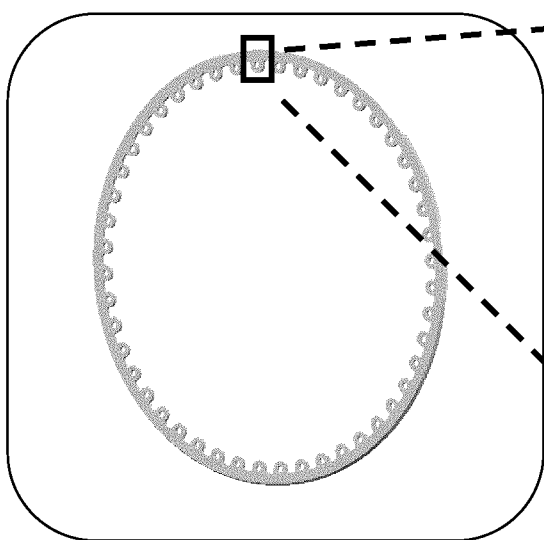


Figure 9 – Bride complète

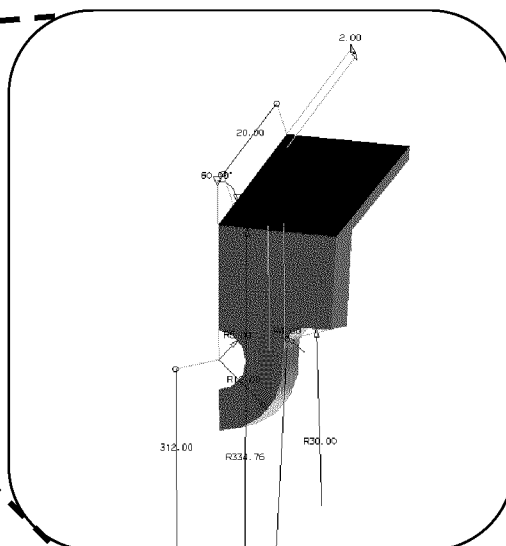


Figure 10 – Modèle CATIA & Paramètres

Cet exemple permet de montrer les différences de résultats à travers différentes stratégies de maillage et donc d'illustrer l'impact sur une éventuelle optimisation de la bride. En effet, l'optimisation nécessite le calcul des sensibilités qui, dans ce cas, sont calculées par différences finies.

Trois stratégies sont étudiées :

- ❑ un maillage libre (figure 11),
- ❑ un maillage réglé (figure 12),
- ❑ un maillage hybride (figure 13).

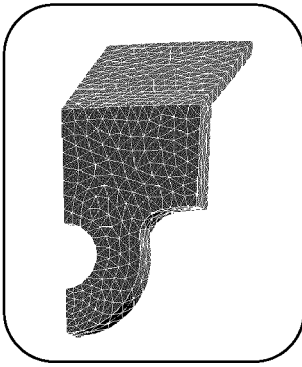


Figure 11 – Maillage libre

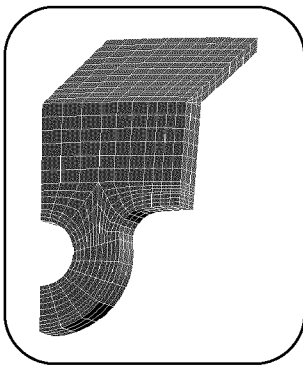


Figure 12 maillage réglé

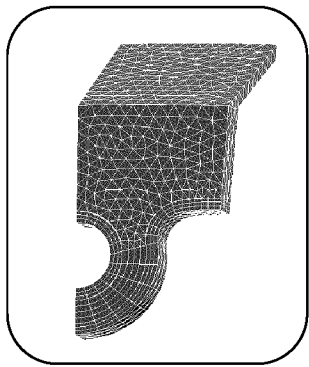


Figure 13 maillage hybride

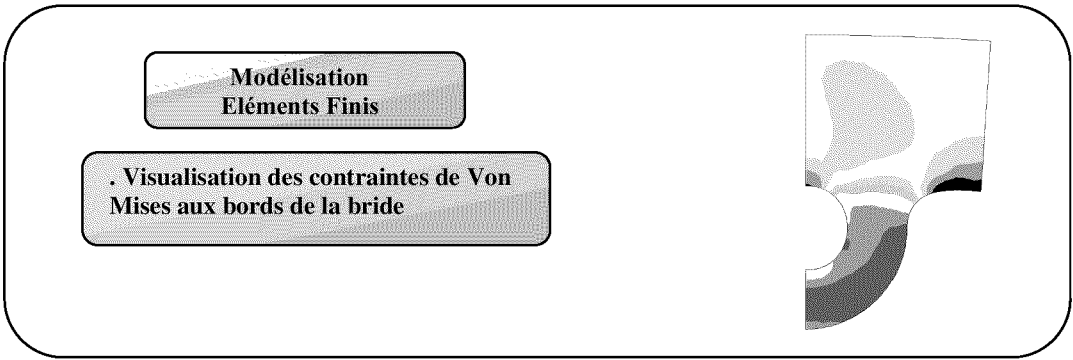


Figure 14 Visualisation des contraintes dans la bride

La figure suivante montre l'évolution de la contrainte de Von Mises maximale atteinte en fond de trou, en fonction du rayon de fond de feston.

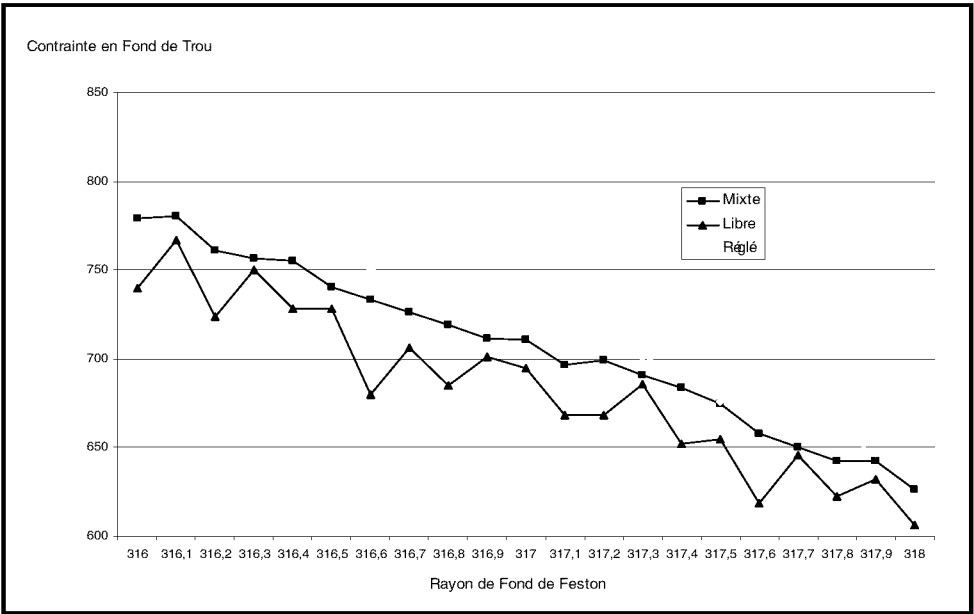


Figure 15 Evolution des contraintes maxi en fonction du rayon de feston

Ces courbes permettent de constater que les résultats obtenus sont très sensibles au type de maillage employé.

Le niveau moyen de la contrainte est différent pour chacune des courbes. Cela s'explique par le fait que les mailles sont de tailles différentes suivant le type de maillage. Les pentes sont aussi très différentes. Cette différence s'explique par la variation de l'élément le plus contraint. Cette variation est d'autant plus grande que l'on utilise un maillage libre.

Cette étude montre qu'en l'absence de perturbateur de maillage une optimisation ne peut être réalisée sur un maillage libre. En effet, les sensibilités sont fausses et empêchent les algorithmes d'optimisation de converger.

Cependant la complexité des pièces étudiées rend parfois délicat la réalisation d'un maillage réglé. Combinant les avantages de l'une et de l'autre, la stratégie de « maillages hybrides » est un bon compromis pour être appliquée dans une chaîne d'optimisation.

Conclusion

Les deux exemples proposés illustrent qu'en quelques années les techniques d'optimisation ont évolué de façon importante et permettent désormais de traiter des problèmes d'optimisation de forme de plus en plus complexes. Ainsi, il est possible d'utiliser tous les types d'analyse mécanique et également de coupler les logiciels de CAO, les logiciels de maillage et les solveurs éléments finis.

Néanmoins, ces exemples illustrent également certains dangers dans l'utilisation des logiciels sans réellement en maîtriser tous les aspects (calcul des sensibilités erroné par une qualité de maillage insuffisante, absence de perturbateur de maillage, fonctions en « escalier » non continues et conduisant à des sensibilités nulles, problèmes des minima locaux, problèmes multi-objectifs, approximation insuffisante des surfaces de réponse, etc.).

Nous avons noté d'autres freins d'utilisation de l'optimisation qui sont liés, non pas à l'optimisation en elle-même, mais à la difficulté de réalisation des modèles paramétrés (CAO ou maillage automatique complètement associé à la CAO) et à la difficulté de poser correctement un problème d'optimisation.

Nous travaillons pour lever ces quelques imperfections et il nous apparaît également nécessaire de former et d'aider les ingénieurs d'un bureau d'études afin qu'ils acquièrent « un niveau de culture en optimisation ».

Pour conclure, nous sommes convaincus que la facilité d'utilisation des futurs logiciels de CAO paramétrés comme CATIA v5 et l'intégration de la plupart des logiciels de maillage dans ces environnements vont permettre de multiplier de façon importante les études d'optimisation et de rendre plus industrielles les études multi-disciplinaires.

Paper #13

Discussor's name: Kirit Patel

Author's name: Mr. Girard

Q: In your pre-optimization process, you spent some time in the design of the disc you showed. How much improvement in design time has resulted from your new optimization method?

A: The optimization techniques allow us to explore a much larger space in the design area for the same amount of time as traditional techniques. Consequently, the main improvement is not in design time, but in quality of the final design. This results in direct reduction of time and cost in the global design process: it helps to reach the 'Best Design at first time' and reduce non-quality & re-design, therefore reducing cost and delays on a program